

안테나 최근 기술 동향·

휴대 단말기용 안테나를 중심으로

최재훈 · 김정표 · 한민석

한양대학교 전자통신공학부

I. 서 론

4G는 국제전기통신연합(ITU-R)이 지난 2005년 이동 중 100 Mbps, 정지 중 1 Gbps급 전송 속도를 제공하는 미래 무선 통신 기술이라고 정의한 차세대 이동 통신 서비스이다^[1]. 이러한 4G 기술은 유무선 컨버전스, 다양한 액세스 기술 간의 컨버전스, 이동 통신 기술의 광대역화를 목표로 하나의 단말기에 다양한 대역과 다양한 서비스로 발전될 것이다. 따라서 4G 모바일 기기는 WiMax, LTE와 함께 GSM, GPRS, EDGE, WCDMA, HSDPA, Wi-Fi, 모바일 TV, 블루투스 등을 포함하는 수많은 무선 인터페이스를 필요로 할 것이다.

이러한 다양한 서비스를 하나의 단말기로 제공하기 위해서는 많은 안테나가 단말기에 구현되어야 한다. 현재까지는 주로 다중 대역 또는 광대역 안테나를 이용하여 다수의 서비스를 제공하고 있지만, 향후 서비스가 예정되어 있는 WiMax, LTE 등이 요구하는 고속, 대용량 서비스를 수용하기 위해서는 MIMO와 같은 추가적인 기능이 요구되고 있다^[2]. 예를 들면, 기존에 주로 사용되고 있는 이동 통신용 다중 대역 안테나 1개, GPS 안테나, 블루투스 안테나 각 1개 등과 모바일 방송 서비스용 안테나 1개를 기본으로 하고, LTE 및 M-WiMax 등의 4세대 통신용 MIMO 안테나 시스템을 위해 최소 2개 안테나가 추가되면서 최소 6개 이상의 안테나가 하나의 단말기에 구현되어야 한다. 하지만 단말기의 크기는 제한되어 있고, 제공하는 서비스가 증가하면서 시스템이 복잡해지고 부피가 증가하면서 상대적으로 안테나 장착 공간은 줄어들고 있다. 특히 LTE용 MIMO 시스템에서는

2.5 GHz 대역 이외에도 700 MHz 대역이 주목을 받으면서 안테나 공간에 대한 압박이 더욱 커지고 있다. 또한 각 안테나들 간의 간섭뿐만 아니라 인체 영향에 대한 고려가 동시에 진행해야 하기 때문에 안테나 설계가 매우 어렵다. 최근에는 Green-IT 개념이 이슈화되면서 모든 통신 기기들의 저전력화가 요구되고 있는데, 이동 통신 기기에서는 저전력화에 따른 통신 환경의 악화를 다이버시티 기법을 통해 극복하고자 하는 노력이 진행 중이다. 따라서 제한된 공간 내에서 다수의 안테나들을 보다 효율적으로 배열 또는 활용할 수 있는 고효율 안테나 연구가 많은 관심을 받고 있다. 하지만 MIMO나 다이버시티와 같은 다중 안테나 시스템이 추가로 요구되면서 안테나는 기존 안테나의 1/3~1/4 이하의 크기를 만족시켜야 하기 때문에 안테나 개발을 더욱 어렵게 하고 있다.

일반적으로 기존의 소형화 방법으로는 $\lambda/10$ 이하의 크기로 안테나 구현이 어려울 뿐만 아니라 광대역 또는 다중 대역 특성 또한 얻기 어렵기 때문에 다양한 서비스 대역을 하나의 단말기로 제공하기에 부적합하다. 한편, 소형화 기법으로 최근 큰 이슈가 되고 있는 메타 구조 영차 공진 안테나는 $\lambda/10$ 이하의 안테나 구현에도 큰 어려움이 없다. 하지만 이 기법은 이동 통신 대역 주파수에 적용하기에는 단위 셀 자체의 물리적 크기가 이론 특성과 달리 커지면서 소형화에 문제점을 나타내고 있고, 협대역 특성과 다중 대역 구현의 어려움 때문에 현재의 이동 통신 서비스에는 적용하지 못하고 있다. 본 고에서는 최근 이슈가 되고 있는 차세대 이동 통신 시스템의 핵심 기술인 MIMO 안테나와 메타 구조를 응용한 초소형 및 주파수 가변 안테나 등의 최근 연구 동향을 살펴본다.

II. MIMO 안테나

휴대 단말기에서 MIMO 시스템을 구현하기 위해서는 둘 이상의 안테나를 하나의 단말기에 적용해야 하기 때문에 안테나의 소형화뿐만 아니라 안테나 간의 전자기 결합을 최소화하기 위한 다양한 방법들이 연구되고 있다. 본 장에서는 MIMO 안테나의 성능을 평가하는 주요 지표에 대해 기술하고, 이러한 성능 지표를 향상시키기 위해 최근 발표된 대표적인 MIMO 안테나의 연구 내용을 주요 특징 별로 분류하여 소개한다.

2-1 MIMO 안테나의 주요 성능 지표

2-1-1 평균 유효 이득(MEG: Mean Effective Gain)과 MEG 비율(Ratio)

평균 유효 이득은 전체 평균 입사 전력과 평균 수신 전력의 비로써 아래 식과 같이 나타낼 수 있다^[3].

$$MEG = \frac{\text{Mean Received Power}}{\text{Total Mean Incident Power}} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left(\frac{XPR}{1+XPR} G_\theta(\theta, \phi) P_\theta(\theta, \phi) + \frac{1}{1+XPR} G_\phi(\theta, \phi) P_\phi(\theta, \phi) \right) \sin \theta d\theta d\phi \quad (1)$$

여기서, XPR은 직교 편파비를 나타낸다. 균일한 Rayleigh 환경(등방성 환경)에서 $XPR=1$, $P_\theta = P_\phi = 1/4\pi$ 이고, MEG는 안테나 전체 방사 효율을 2로 나눈 값과 같다. 즉,

$$MEG_i = \frac{e_{tot}^i}{2} \quad (2)$$

$$e_{tot}^i = e_{mis}^i \cdot e_{rad}^i \quad (3)$$

$$e_{mis}^i = 1 - \sum_{j=1}^N |S_{ij}|^2 \quad (4)$$

또한, 우수한 다이버시티 이득 성능을 얻기 위해서는 각각의 안테나로부터 수신된 평균 전력이 거의 같아야 한다. 즉, 수신 안테나의 MEG 비율이 일정한 지가 중요한 요소이고, 두 안테나의 MEG 값의 차에 대한 절대값이 3 dB 이내가 되도록 해야 한다^[4].

$$P_i \approx P_j (|MEG_i - MEG_j| < 3dB; i, j = 1, 2, 3, 4; i \neq j) \quad (5)$$

2-1-2 상관계수(ECC: Envelope Correlation Coefficient)

입사된 파의 크기가 Rayleigh 분포를 따르고, 위상 분포가 균일하다고 가정하면, 두 안테나 사이의 상관계수 ρ_e 값은 아래 식으로 나타낼 수 있다^[5].

$$\rho_e \approx |\rho_c|^2 = \frac{|\iint \{XPR \cdot E_{\theta_1}(\Omega) E_{\theta_2}^*(\Omega) P_\theta(\Omega) + E_{\phi_1}(\Omega) E_{\phi_2}^*(\Omega) P_\phi(\Omega)\} d\Omega|^2}{\iint \{XPR \cdot E_{\theta_1}(\Omega) E_{\theta_1}^*(\Omega) P_\theta(\Omega) + E_{\phi_1}(\Omega) E_{\phi_1}^*(\Omega) P_\phi(\Omega)\} d\Omega \times \iint \{XPR \cdot E_{\theta_2}(\Omega) E_{\theta_2}^*(\Omega) P_\theta(\Omega) + E_{\phi_2}(\Omega) E_{\phi_2}^*(\Omega) P_\phi(\Omega)\} d\Omega} \quad (6)$$

여기서, XPR은 교차 편파 전력비를 나타내는 값으로 수신된 θ 방향과 ϕ 방향으로 입사된 입사파의 평균 전력비를 나타내고, $E_{\theta k}, E_{\phi k}$ ($k=1,2$)는 안테나 배치에 따른 위상차를 포함하는 전개 패턴에 대한 θ 와 ϕ 성분의 복소수 표현이다.

MIMO 안테나 성능 검증을 위해 주로 사용되는 성능 지수인 상관계수는 방사 패턴으로부터 구할 수 있는데 계산 과정이 복잡하므로, 균일한 다중 경로 환경을 가정하면 측정된 산란 파라미터로부터 상관계수를 근사화 시켜서 아래 식처럼 구할 수 있다.

$$\rho_e = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{12}^* S_{22}|}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)} \quad (7)$$

위의 근사식은 무 손실 안테나의 경우 균일한 다중 경로 환경을 가정하고, 시뮬레이션 결과와 측정된 결과의 S 파라미터 값들로부터 쉽게 계산 가능할 값으로 MIMO 안테나 성능 검증 파라미터로 가장

많이 사용되고 있다. 좋은 다이버시티 성능을 얻기 위한 조건은 상관계수가 작아야 한다. 이 때, 적절한 상관계수 값은 기지국에서 0.7 이하를 만족해야 하고, 휴대 단말에서는 0.5 이하를 만족해야 한다^[6].

2-1-3 격리도(Isolation)

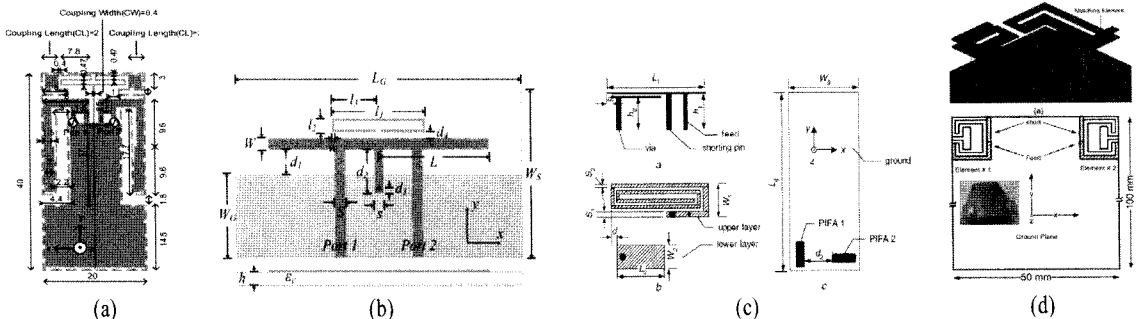
아주 작은 공간에 둘 이상의 안테나를 배치하는 경우, 가까이 배열된 안테나 소자간 방사 결합을 포함한 상호 결합의 영향은 MIMO 안테나의 성능을 저하시키는 주요 원인이 된다. 다시 말해서, 아주 작은 공간에 MIMO 안테나 시스템을 적용하기 위해서는 안테나의 크기뿐만 아니라 적합한 안테나 배열법 또한 고려해야 한다. MIMO 안테나 시스템의 주요 특성 중 하나인 격리도 특성은 복수 개의 안테나들 간의 결합도와 매우 큰 연관성을 가진다. 복수 개의 안테나들 간의 결합도가 낮을 경우에는 안테나들의 격리도 특성이 향상되나, 결합도가 높을 경우에는 안테나들의 격리도 특성이 악화된다.

2-2 격리소자를 삽입하거나 슬릿 또는 스테르브를 이용해서 접지면을 변형시키는 방법

두 안테나 간의 격리도 특성을 확보하기 위한 가장 대표적인 방법은 $\lambda/4$ 의 길이를 갖는 슬릿 또는 스테르브 등의 공진 특성을 이용하는 방법이다. 이 방법들은 접지면을 통해 흐르는 전류를 차단함으로써

두 입력 단자 간의 격리도를 확보하는 방법이다.

[그림 1]에서는 다양한 구조의 격리 소자 및 구조를 보여준다. [그림 1](a)는 전자계 상쇄 기법을 이용한 것으로 격리도 특성 개선을 위해 두 안테나 사이에 같은 주파수 대역에 동작하는 전자기 결합 소자를 추가하였다^[7]. [그림 1](b)는 집적된 이중 PIFA로 소형화를 위해 비아 홀을 활용하였다. 격리도 특성 개선을 위해 두 안테나 윗부분에 hair-pin 형태의 $\lambda/2$ 길이의 공진기를 추가하였다^[8]. [그림 1](c)는 각각의 안테나 소형화를 위해 나선형 PIFA와 LC 공진기를 형성하는 전자기 결합 급전 방식을 사용하였다. 격리도 특성 개선을 위해 두 PIFA는 서로 직각이 되도록 편파를 이루도록 하였다^[9]. [그림 1](d)는 0.63 cm^3 의 체적 내에 4중 대역(2.4~2.5 GHz, 3.4~3.6 GHz, 5.15~5.35 GHz와 5.75~5.875 GHz)을 만족시킨 MIMO 안테나로 일반적인 단일 대역 PIFA에 'C' 구조 슬롯과 'T' 구조 슬롯을 조합해서 세 개의 전류 모드를 형성한다. 4중 대역 동작을 위해 추가적인 $\lambda/4$ 공진기가 삽입되었다^[10]. 이와 같이 격리소자를 삽입하거나 슬릿 또는 스테르브를 이용해서 접지면을 변형시키는 방법은 격리 소자, 스테르브의 추가적인 실장 공간이 필요하거나 접지면의 슬릿에 의한 다른 부품의 실장 공간이 줄어들기 때문에 공간상의 제약사항이 많다. 특히, 700 MHz의 LTE 대역의 경우, 더 많은 추가적인 공간을 필요로 하기 때문에 이와 같은 방법들



[그림 1] 액티브 안테나 모듈(증폭기)과 안테나를 분리할 수 없는 경우

적용하기에는 상당한 어려움이 있다.

2-3 다이버시티(Diversity) 기법을 적용하는 방법

충분한 다이버시티 효과를 얻기 위해서는 두 안테나 출력 신호간에 있어서 상관이 적은 것이 요구된다. 공간적으로 안테나 소자의 간격을 두는 것만으로 낮은 상관관계를 얻기 위해서는 이론상 약 0.3 파장 이상이 필요하다. 그러나 휴대 단말기에서는 안테나들의 실장 공간이 제한되어 있기 때문에 0.3 파장을 이격시키기가 상당히 어렵다. 따라서 휴대 단말기와 같이 협소한 공간에서도 구현 가능한 다양한 다이버시티 기법들에 대한 연구가 활발하다.

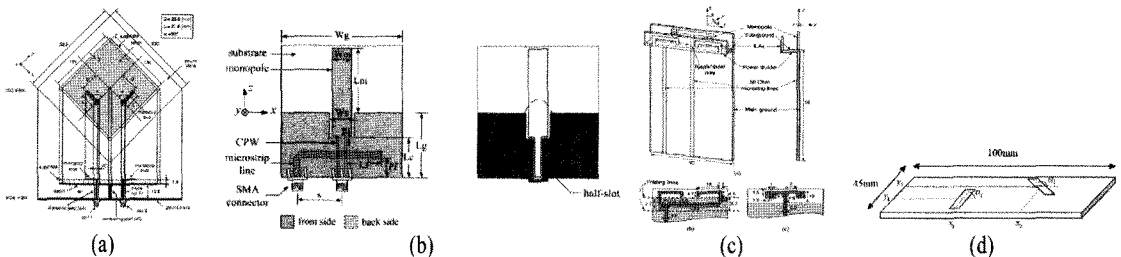
[그림 2]는 다양한 형태의 다이버시티 기법이 적용된 MIMO 안테나를 보여준다. [그림 2](a)는 높은 격리도 특성을 갖는 이중 편파 마이크로스트립 안테나 이중 커패시턴스 급전 방식과 방사 패치 위의 개방 스테이블를 이용하여 높은 격리도 특성을 구현하였다. 프로브가 단락되어 있는 중심으로 올수록 격리도 특성 개선 효과가 뛰어난 것을 알 수 있다^[11]. [그림 2](b)는 초소형 평면형 이중 안테나 구조로 이중 편파 구현을 위해 프린트형 모노폴과 반파장 슬롯 안테나를 결합한 형태이다. 두 안테나 소자 사이의 낮은 전자기 결합 특성을 얻기 위해 서로 다른 여기된 전류 모드를 사용하였다^[12]. [그림 2](c)는 패턴 다이버시티와 편파 다이버시티를 둘 다 이용해서 높은 격리도 특성을 가진다. 저자세(low profile) 모노폴과

180° 위상차로 급전되는 두 개의 역 L형 안테나로 구성되고, 180° 위상차 급전을 위해 간단한 'T'형 전력 분배기가 사용되었다^[13]. [그림 2](d)는 모멘트법과 가역성 정리에 기초한 상관계수를 최소화하는 효율적인 방법을 제안하고 있다. 이를 위해 접지면에 존재하는 자기전류에 의한 방사된 계를 모델링 하였다. 최대 시스템 용량을 얻기 위해서는, 두 안테나 사이의 상호 상관관계 값을 최소화해야 하고, 이를 위해 안테나 위치, 방위, 편파 등의 파라미터들을 최적화해야 한다^[14]. 하지만 이와 같은 다이버시티 기법들은 협소한 공간에서도 구현이 가능하지만 대부분 둘 이상의 기법을 혼용해서 사용해야 효과적이다. 특히 다이버시티 성능을 나타내는 중요한 성능 지수중의 하나인 MEG 값을 추출하고 주 안테나와 부 안테나 사이의 MEG 비율이 3 dB 이내가 되도록 구현해야 한다.

2-4 Decoupling Network(Neutralization 또는 Suspended line)를 사용하는 방법

협소한 안테나 실장 공간에서 격리 특성을 구현하는 방법들은 주로 일정 정도의 공간이 필요하기 때문에 공간 활용에 많은 어려움이 따른다. 하지만 디커플링 회로망 방법은 안테나 사이에 전자기 결합을 최소화시키기 위한 정합 회로만을 추가함으로써 격리도를 향상시킬 수 있기 때문에 공간 활용도를 높일 수 있다.

다양한 디커플링 회로망이 적용된 격리도 향상



[그림 2] 액티브 안테나 모듈(증폭기)과 안테나를 분리할 수 없는 경우

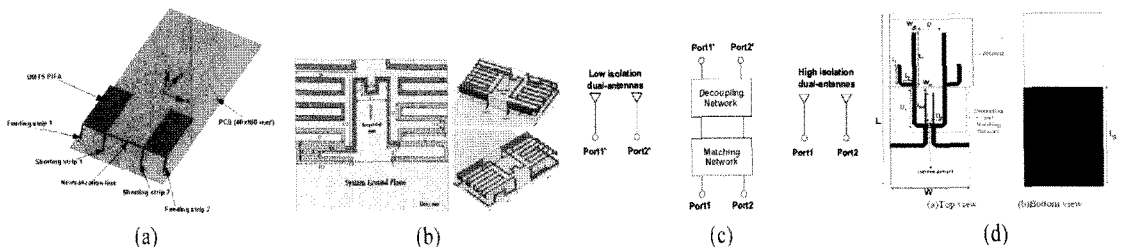
기법이 [그림 3]에 소개된다. [그림 3](a)는 UMTS 대역에서 동작하는 두 개의 PIFA 사이의 격리도 특성 개선을 위해 두 개의 단락 선로 사이에 디커플링 기법인 두 단락 선로를 연결하는 선로 SPL(suspended line)을 사용하는 방법과 두 개의 급전 선로 사이에 두 방사 소자를 연결하는 선로 SPL을 사용하는 방법을 구분하여 나타내었다. SPL의 전체 길이, SPL과 시스템 접지면 사이의 거리가 인덕턴스와 커패시턴스를 결정하게 된다^[15]. [그림 3](b)는 두 개의 전형적인 모노폴 안테나와 격리도 특성 개선을 위해서 두 모노폴 안테나 사이에 미앤더 구조의 SPL을 사용하였다. 이 때, 미앤더 구조의 SPL은 대역 저지 필터처럼 동작하게 되며, SPL의 전체 길이, SPL과 시스템 접지면 사이의 거리가 인덕턴스와 커패시턴스를 결정하게 된다^[16]. [그림 3](c)는 두 개의 똑같은 안테나 사이의 거리가 아주 가까운 경우 적용되는 기법으로, ECC를 최소화 하는 방법을 제시하였다. 최적화 조건은 S 파라미터로부터 추출한 ECC 표현식으로부터 추출하게 되고, ECC값을 최소화하기 위해 S_{11} , S_{12} 를 최소화 하거나, S_{11} 과 S_{12} 의 위상 향이 적고 위상이 되도록 만들어 줘야 한다. 이 때, 분모 항에 해당하는 유효 방사 전력 $(1 - |S_{11}|^2 - |S_{12}|^2)$ 이 최대가 된다^[17]. [그림 3](d)는 두 개의 서로 근접한 위치에 위치하면서 높은 격리도 특성을 갖는 이중 대역 안테나로 디커플링 회로망은 50 Ω 전송 선로와 LC 공진기로 구성된다. 이 때, 공진기는 저주파수 대역에서 인덕턴스로 고주파수 대역에서 개방 회로로 동작한다. 디

커플링과 정합 회로망은 리액턴스 성분만 갖기 때문에 전력 손실이 없고, 두 개의 고임피던스 마이크로 스트립 스텐드와 추가적인 커패시터가 임피던스 정합을 위해 입력 단자에 연결되었다^[18]. 이러한 디커플링 회로망은 기존의 두 안테나 사이의 거리가 아주 가까운 경우에도 적용 가능한 기법 중 하나로 두 안테나 사이의 S_{21} 의 크기와 위상을 추출하여 이 값을 보상해 주는 회로만 추가함으로써 격리도 특성을 개선할 수 있는 장점을 갖고 있다. 하지만, 이러한 기법은 특정 단일 주파수 대역에서만 적용할 수 있다는 단점을 갖고 있다.

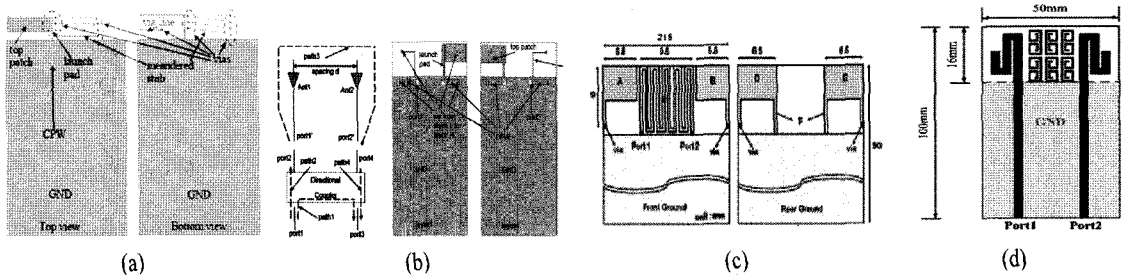
2-5 메타 구조(MTM: Metamaterials)를 이용하는 방법

최근 들어 메타 구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, MIMO 안테나 시스템에도 안테나 소자 뿐만 아니라 격리도 향상을 위해 다양하게 응용되고 있다.

[그림 4](a)는 2개의 CPW로 급전되는 MTM ZOR 안테나를 사용하여 MIMO 안테나의 효율, 격리도, 상관관계수 특성을 개선하였다. MTM ZOR의 단점인 대역폭 특성 개선을 위해 미앤더 라인 스텐드를 사용해서 두 번째 공진을 생성함으로써 대역폭을 개선하였다^[19]. [그림 4](b)는 두 개의 MTM ZOR 안테나의 격리도 특성 개선을 위해 두 안테나 사이에 방향성 결합기를 삽입하였다^[20]. [그림 4](c)는 MTM 안테나를 사용하여 전기적 소형 안테나를 구현하였고, 격리도



[그림 3] Decoupling network를 사용한 MIMO 안테나



[그림 4] 메타 구조를 이용한 MIMO 안테나

특성 개선을 위해 두 안테나 사이에 대역 저지 특성을 갖는 자기상관구조를 사용하였다^[21]. [그림 4](d)는 두 개의 전통적인 폴디드 모노폴과 SRR(Split Ring Resonator) 구조의 SNG(single negative) MTM로 구성되고, MIMO 안테나의 전자기 결합을 줄이기 위해 SRR 주기 구조를 사용하였다. 단위 셀에 비해서 결합된 단위 셀을 사용함으로써 격리도 대역폭이 더 넓어지는 특성을 갖는다^[22]. 메타구조를 이용하는 방법은 소형화 및 격리도 특성 개선을 위한 다양한 방법을 제시해 주었지만, 아직까지 좁은 대역폭과 낮은 방사 효율로 실제적으로 MIMO 안테나에 적용하기에는 아직까지 어려운 문제점을 갖고 있다.

MIMO 안테나 시스템을 구현하기 위해서는 반 파장보다 아주 작은 공간 내에 둘 이상의 안테나 소자가 배치되어야 하므로 공간상의 제약 사항들이 많다. 차세대 휴대 단말기나 USB 동글에 MIMO 안테나를 적용할 경우, 가까이 배열된 안테나 소자간 방사 결합을 포함한 상호 결합의 영향은 MIMO 안테나의 성능을 저하시키는 주요 원인이 된다. 지금까지 MIMO 안테나 연구 동향을 정리하면 이러한 상호 결합의 영향을 최소화시키기 위한 방법으로 디커플링 회로망을 사용하는 방법, 다이버시티 기법을 적용하는 방법, 격리 소자를 삽입하거나 슬릿 또는 스텐드를 이용해서 접지면을 변형시키는 방법, 메타 구조를 이용하는 방법 등 다양한 방법들이 MIMO 안테나 설계를 위해 사용되고 있다. 하지만 현재 저주파 대역인 LTE

대역과 M-WiMAX 대역을 포함한 다중 대역 MIMO 안테나에 대한 연구와 MIMO 안테나에 있어서 가장 중요한 부분인 MEG, MEG ratio, ECC 등의 MIMO 안테나 성능 파라미터와 MIMO 시스템 성능과의 상관관계에 대한 연구는 미비하고 이에 대한 연구가 필요하다.

Ⅲ. 메타구조를 응용한 초소형 안테나와 주파수 가변형 안테나

일반적으로 메타 구조(MTM: metamaterial)란 자연계에서 흔히 볼 수 없는 특수한 전자기적 성질을 나타내도록 인공적인 방법으로 합성된 물질을 통칭하는 용어이다. 이중 흔히 DNG(Doubly Negative Material), NRI(Negative Refractive Index), LHM(Left Handed Material) 등의 여러 이름으로 불리는 물질들은 어떤 특정 조건하에서 그 유효 유전율과 유효 투자율이 모두 음의 값을 갖게 되며, 이에 따라 일반적인 물질과는 매우 다른 전파 전파 특성을 나타낸다. 메타 구조의 가장 대표적인 응용 예가 영차 공진 구조(ZOR: Zeroth Order Resonator)이다. 두 개의 도체판 사이에 양의 굴절율을 갖는 일반적인 물질과 음의 굴절율을 갖는 LHM을 평면 형태로 겹쳐 놓으면 두 매질에서의 위상이 0이 되는 주파수에서 공진 발생하게 되는데, 두 매질에서의 위상이 같은 크기를 가지기만 하면 그 절댓값은 공진 조건에 전혀 영향을 미치지 않으므로

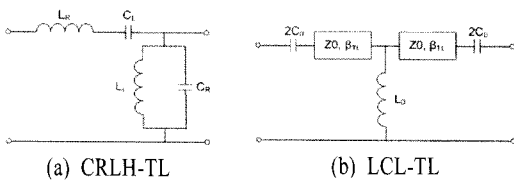
공진기의 크기를 파장에 무관하게 설계 가능하다. 따라서 영차 공진기는 물리적 크기와 전기적 크기가 독립적으로 선택할 수 있기 때문에 공진 회로의 소형화가 가능하다. 이와 같은 원리를 회로에 적용함으로써 소형 안테나 설계가 가능하다. 즉, RH 구조와 LH 구조를 혼합하여 소형 공진기 구성이 가능하기 때문에 칩 인덕터와 칩 커패시터를 이용하여 LH 특성을 구현하고, 도체 스트립 선로 등의 구조물이 RH 특성을 제공함으로써 전체적으로 RH 구조와 LH 구조가 혼합된 공진기로 해석이 가능하다. 이 경우 공진 주파수는 기본적으로 크기에 제한을 받지 않기 때문에 안테나의 크기를 크게 감소시킬 수 있다^[23].

MTM ZOR 안테나 설계에 사용되는 대표적인 단위 셀로는 CRLH-TL(Composite Right/Left Handed Transmission Line) 구조와 LCL-TL(LC Loaded Transmission Line) 구조가 있다. CRLH-TL의 경우 L_R, C_R, L_L, C_L 값들을 결정하는 성분들이 주파수에 민감하게 반응하기 때문에 UHF 대역 및 이동 통신 대역과 같이 낮은 주파수 대역에 적용하기에는 적합하지 않으며, 현재까지 발표된 대부분의 연구 결과에서도 주로 3 GHz 이상의 대역에서 적용되고 있다. 한편, LCL-TL의 경

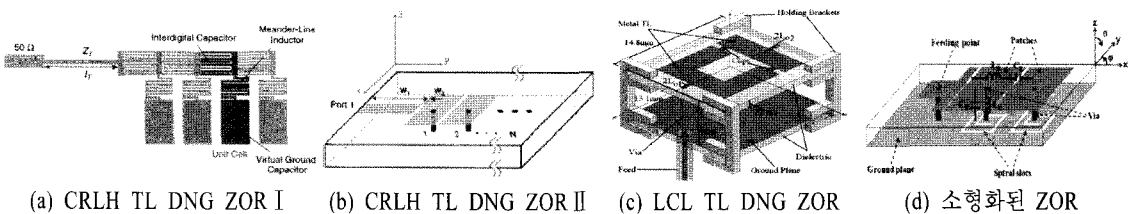
우 일정한 단위 셀 길이를 갖고 C_0, L_0 값을 통해 다양한 주파수 대역에서 동작이 가능하지만, UHF 대역까지 적용하기 위해서는 높은 값의 C_0, L_0 가 필요한데, 이 경우 대역폭이 매우 협해지고 인덕터와 커패시터의 손실이 커지기 때문에 안테나 방사 효율이 저하된다.

3-1 MTM ZOR 안테나

일반적인 MTM ZOR 안테나는 DNG ZOR 구조를 이용한다. 즉, 직렬 인덕터와 병렬 커패시터의 RH 특성과 직렬 커패시터와 병렬 인덕터의 LH 특성의 평형 상태 조건을 만족시킴으로써 영차 공진 특성을 구현한다. [그림 6]은 대표적인 DNG ZOR을 보여준다. [그림 6](a)는 CRLH TL 단위 셀 구조를 바탕으로 하는 DNG ZOR 안테나이다. 인터디지털 커패시터를 이용하여 직렬 커패시터를 구현하고, 미앤더 라인을 가상 접지면에 연결하여 병렬 인덕터를 구현함으로써 LH 특성을 나타낸다. RH 특성은 각 구성 성분들의 기생 성분들의 영향으로 LH 특성과 RH 특성을 조정하여 영차 공진 특성을 얻을 수 있다^[23]. [그림 6](b)는 mushroom 구조를 이용한 또 다른 CRLH TL DNG ZOR 안테나 구조이다. Mushroom의 패치와 패치 간의 갭 커패시터와 비아를 이용하여 LH 특성을 구현하여 영차 공진 안테나를 구현할 수 있다^[24]. 하지만 직렬 커패시터 성분(인터디지털 커패시터, 갭 커패시터 등)과 병렬 인덕터 성분(미앤더 선로, 비아 등)은 주파수의 변화에 따라 커패시턴스와 인덕턴스가 달



[그림 5] MTM 단위 셀 구조

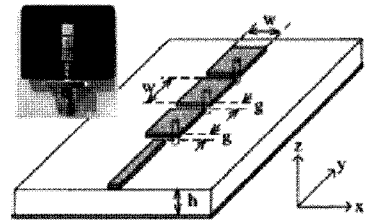


[그림 6] DNG ZOR 안테나

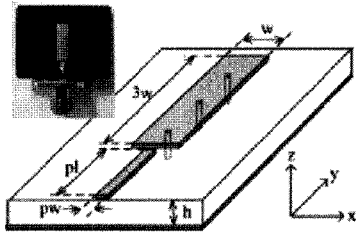
라지므로 저주파수에서 영차 공진 조건을 만족시키기 위해서는 물리적 크기가 증가하기 때문에 이론적 영차 공진과 달리 저주파수 대역에서는 물리적 크기가 증가하게 된다. [그림 6](c)는 LCL TL 단위 셀 구조를 기반으로 하는 DNG ZOR 안테나이다. 칩 인덕터와 칩 커패시터를 이용하여 LH 특성을 구현하고, 마이크로스트립 선로가 RH 특성을 나타낸다^[25]. 칩 소자를 이용하기 때문에 비교적 낮은 주파수 대역에서도 물리적 크기의 변화 없이 영차 공진 안테나를 구현할 수 있는 장점을 갖는 반면, 이 경우 칩 인덕터 값이 커지면서 좁은 대역 특성과 방사 효율이 낮아지는 단점을 갖는다. DNG ZOR 안테나는 그 구조와 상관없이 안테나 전체 위상이 동일하여 병렬 인덕터 성분(미앤더 라인, 비아 등)에서 주로 방사가 이루어지기 때문에 CRLH TL ZOR I은 지향 특성, CRLH TL DNG ZOR II와 LCL TL DNG ZOR은 미소 모노폴과 같이 전지향성 특성을 갖는다. 한편, CRLH TL DNG ZOR 안테나는 전체 체적은 유지하면서 병렬 인덕터를 증가시키므로써 소형화가 가능하다. 참고 문헌 [26]에서는 CRLH TL DNG ZOR의 기본 구조에서 비아로 구성된 병렬 인덕터 값을 증가시키기 위해 접지면에 나선형 슬롯을 추가하였다([그림 6](d)). 이 경우 상단의 CRLH TL에서의 전류 흐름에 큰 영향을 주지 않기 때문에 안테나 방사 효율 감소를 최소화 하면서 안테나 동작 주파수를 78 %까지 낮출 수 있다.

3-2 ENG ZOR 안테나

[그림 7]은 DNG ZOR 안테나와 ENG ZOR 안테나의 구조를 비교해서 보여준다. ENG ZOR 안테나는 DNG ZOR에서 직렬 커패시터 구조를 제거함으로써 안테나의 구조를 보다 단순화 시킨 구조이다. 비록 DNG 구조처럼 LH 영역을 활용할 수는 없지만 DNG ZOR과 같은 영차 공진 특성을 유지할 수 있기 때문에 많은 관심을 받고 있다^{[24],[27]}.



(a) CRLH TL DNG ZOR



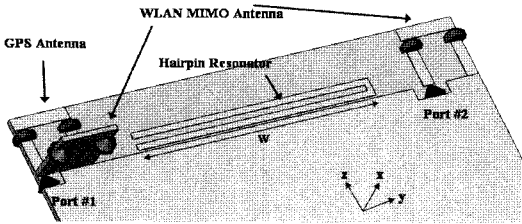
(b) LCL TL ENG ZOR 안테나

[그림 7] DNG ZOR 안테나와 ENG ZOR 안테나의 구조

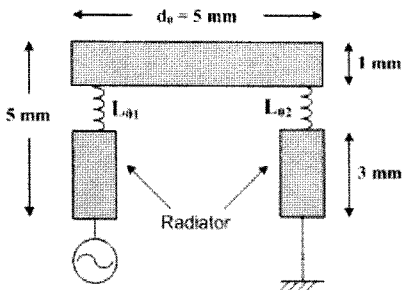
ENG ZOR 안테나는 LCL TL을 이용하면 보다 소형으로 구현할 수 있기 때문에 휴대 단말기에 실장 가능한 소형 안테나 구현이 가능하다. [그림 8]은 다수의 ENG ZOR을 이용한 다중 대역 다중 안테나 구조를 보여준다. 5×5 mm의 물리적 크기를 고정한 상태에서 두 개의 병렬 인덕터 만을 조정함으로써 각 ENG ZOR의 공진 주파수를 결정할 수 있기 때문에 다중 안테나의 공간 활용도를 높일 수 있다^{[28],[29]}.

3-3 ENG ZOR을 이용한 다중 대역 안테나

ZOR을 이용한 소형 안테나의 가장 큰 단점은 좁은 대역폭과 다중 공진 특성이 어렵다는 것이다. 물론 둘 이상이 단위 셀을 이용할 경우 DNG ZOR은 (-1)차 공진 특성을 이용하여 소형 이중 공진 특성을 구현할 수 있지만, 이 경우 방사 효율이 매우 낮기 때문에 휴대 단말용 안테나로 사용하기에 어렵다. 효율적인 이중 대역을 구현하기 위해 하나의 단위 셀로 구현된 ENG ZOR을 서로 다른 공진 주파수에서 공진시킴으로써 이중 대역 이상의 대역에서 동



(a) ENG ZOR을 이용한 휴대 단말용 안테나



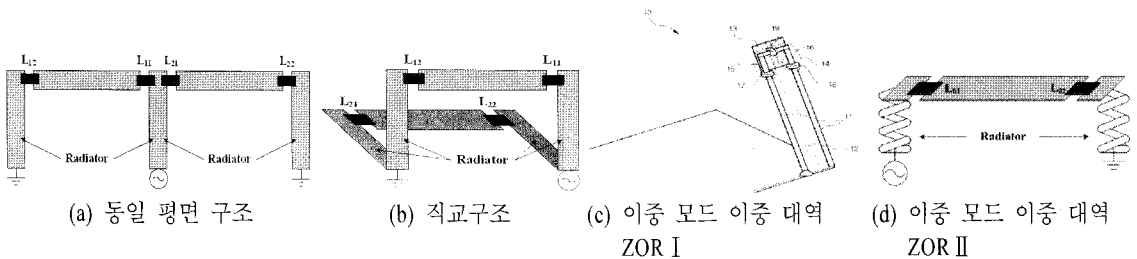
(b) ENG ZOR 안테나 구조

[그림 8] ENG ZOR을 이용한 휴대 단말용 안테나 적용 예

작하는 안테나를 구현할 수 있다. [그림 9]는 다양한 이중 대역 ENG ZOR 구조를 보여준다. [그림 9](a)는 두 개의 ENG ZOR 단위 셀을 같은 평면상에 구현하고, 공진 주파수 f_1 은 L_{11} 과 L_{12} 로 조정하고, 공진 주파수 f_2 는 L_{21} 과 L_{22} 로 조정함으로써 독립적으로 두 공진 주파수를 결정할 수 있다. 이 구조에서는 중앙의 방사 소자는 두 주파수 대역에서 공유하고, 양 측면의 방사 소자는 각 주파수 대역에서 독립적으로 동작하게 된다^[28]. 반면에 [그림 9](b)는 두 단위 셀을

직교 구조로 구현하고, 동일 평면 구조와 동일한 방법으로 공진 주파수들을 결정한다. 이 경우 두 주파수 대역에서의 방사 소자가 서로 직교 편파를 갖기 때문에 서로 독립적으로 동작하게 된다^[29]. [그림 9](c)와 (d)는 이중 모드 ZOR 구조를 보여준다^{[30],[31]}. 이중 모드 ZOR은 저주파수 대역은 ENG ZOR의 영차 공진 원리를 이용하고, 고주파수 대역은 방사 소자 자체의 1차 공진 특성을 이용함으로써 이중 대역 특성을 구현할 수 있다. 특히 [그림 9](d)와 같이 방사 소자로 헬리컬을 이용할 경우 낮은 높이임에도 높은 이득을 얻을 수 있다. 일반적으로 ZOR에서 영차 공진과 1차 공진의 이격 주파수는 크기 때문에 이중 모드 방식의 이중 대역 ZOR은 인접한 두 주파수 대역을 동시에 사용하기에는 부적합하다. 반면에 동일 평면 구조와 직교 구조는 두 개의 ZOR을 이용함으로써 보다 자유롭게 동작 주파수 대역을 선택할 수 있다.

[그림 10]은 휴대 단말기에 적용된 이중 대역 ENG ZOR 안테나의 적용 예를 보여준다^[32]. 안테나의 우측 ZOR의 영차 공진 특성과 1차 공진 특성을 이용하여 가장 낮은 공진 주파수와 가장 높은 공진 주파수를 결정하고, 좌측 ZOR을 이용하여 중간 공진 주파수를 결정하였다. 이때 상측 두 공진 주파수를 인접시킴으로써 높은 주파수 대역에서의 광대역 특성을 구현할 수 있다. 구현된 안테나는 크기가 서로 다른 ZOR을 이용함으로써 독립적인 주파수 조정뿐만 아니라 대칭 구조에 비해 두 주파수 대역에서의 방사 효율



[그림 9] 이중 대역 ENG ZOR 안테나 구조

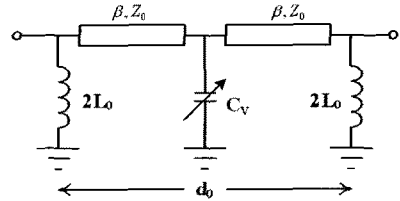
또한 최대로 증가시킬 수 있는 장점을 갖는다. 또한 하나의 유전체 표면에 프린팅 기법으로 ZOR을 구성함으로써 구조가 매우 단순하고 쉽게 휴대 단말기에 장착이 가능하여 성능뿐만 아니라 제조 과정에서도 매우 유리함을 알 수 있다.

3.4 주파수 가변 ENG ZOR 안테나

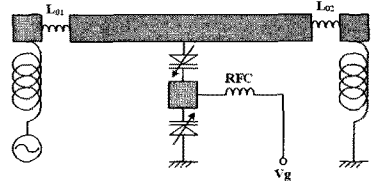
보다 넓은 동작 주파수 대역을 갖는 ZOR을 구현하기 위해서 주파수 가변 소자를 이용할 수 있다. ENG ZOR의 공진 주파수는 병렬 커패시턴스(C_R)과 병렬 인덕터(L_L)에 의해 결정된다. 이중 병렬 커패시터는 기생성분으로 매우 작은 값이기 때문에 벡터 다이오드 등의 가변 커패시터를 추가함으로써 ENG ZOR의 공진 주파수를 쉽게 가변시킬 수 있다^{[33],[34]}.

[그림 11]은 LCL TL 구조를 기반으로 DVB-H 서비스용 휴대 단말기에 적용하기 위해 구현된 주파수

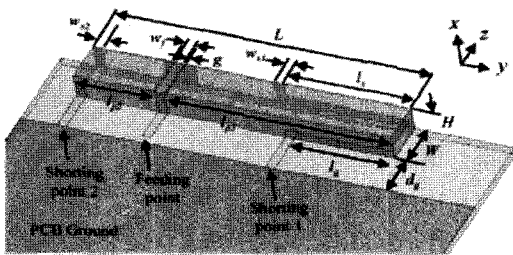
가변 ENG ZOR의 등가 회로와 설계된 안테나 구조를 보여준다. 가변 커패시터 C_V 를 바이어스 전압 0.3~2.7 V 범위에서 조정함으로써 공진 주파수를 474~



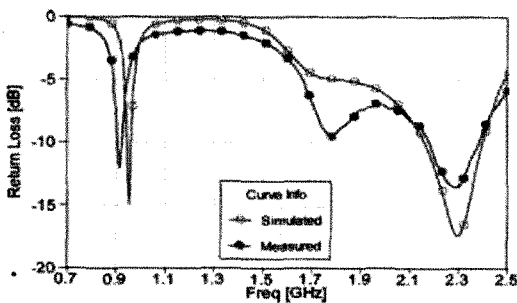
(a) 주파수 가변 ENG ZOR 등가회로



(b) 직주파수 가변 ENG ZOR 안테나 구조

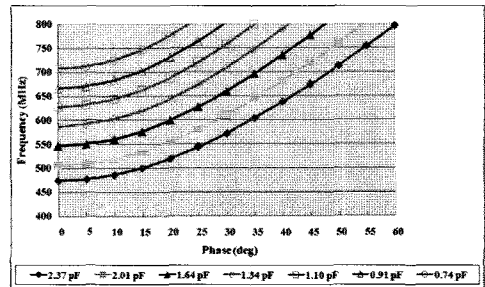


(a) 이중 대역 ENG ZOR 안테나 구조

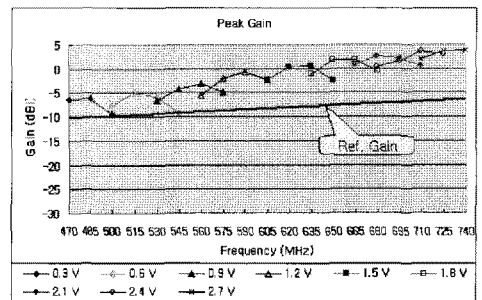


(b) 반사 손실 특성

[그림 10] 휴대 단말기에 적용된 이중 대역 ENG ZOR 안테나



(c) C_V 에 따른 $\beta-\omega$ 곡선 변화



(d) 바이어스 전압에 따른 이득 변화

[그림 11] 주파수 가변 ENG ZOR 안테나

710 MHz까지 가변시킬 수 있다. 이 때 헬리컬 구조를 방사 소자로 활용함으로써 소형화에 따른 안테나 이득을 보상하였고, 병렬 인덕터 값을 증가시키기 때문에 낮은 값의 칩 인덕터를 사용하여 손실을 최소화 할 수 있다. 구현된 안테나는 40×5×5 mm의 초소형으로 구현되었기 때문에 DVB-H용 휴대 단말기에 적용하기에 적합하다^[33].

[그림 12]에서와 같이 두 개의 주파수 가변 ENG ZOR을 동시에 구현함으로써 다양한 형태의 이중 주파수 가변 안테나를 구현할 수 있다^[35]. [그림 9](a)와 (b)에서처럼 이중 대역 ENG ZOR은 서로 독립적으로 주파수 조절이 가능하기 때문에 가변 커패시터를 추가하여 주파수를 조정하더라도 서로 독립적으로 주파수가 조종된다. 따라서 T-DMB와 DVB-H, 이동통신 대역의 저주파수 대역(LTE, GSM850, GSM900)과 고주파수 대역(DCS1800, PCS, US-PCS, WCDMA) 등을 동시에 구현할 수 있다. 하지만 주파수 가변 ENG ZOR 안테나들은 단일 대역 ENG ZOR에 비해 방사 이득이 낮기 때문에 이득 개선에 대한 연구가 필요하다.

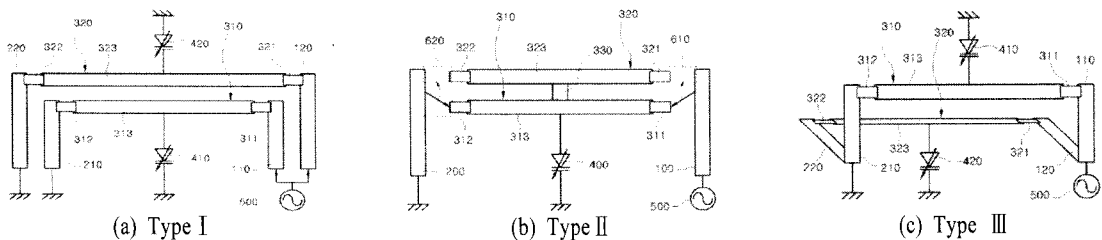
IV. 결 론

본 고에서는 차세대 이동 통신 시스템에서 요구되는 MIMO 안테나와 휴대 단말기에 적용 가능한 메타 구조를 이용한 초소형 안테나에 대해 살펴 보았다. MIMO 안테나의 적용으로 차세대 휴대 단말기들

은 매우 많은 안테나들을 제한된 공간 내에 구현해야 하는 매우 어려운 환경에 놓여 있다. 한편, 메타 구조를 이용한 초소형 안테나는 소형화에 대한 새로운 방향을 제시해 주었지만, 좁은 대역폭과 낮은 방사효율로 상용 휴대 단말기 적용에 어려움이 많았다. 최근에는 주파수 가변 원리를 적용하고 방사 효율 향상을 중심으로 많은 연구가 진행되면서 기존 안테나를 대신하여 휴대 단말기에 적용 가능성이 확인되고 있다. 하지만 비록 소형화에 큰 장점을 갖고 있으면서 많은 성능들이 개선되고 있지만, 여전히 상용 단말기에 적용하기 위해서는 보다 넓은 대역폭과 이득 향상이 요구되고 있다. 따라서 보다 효율적인 휴대 단말기용 MIMO 안테나를 구현하기 위해서는 메타 구조 소형 안테나 및 이를 이용한 MIMO 안테나 시스템에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] 오세근, "최근 4G와 모바일 와이맥스 트렌드", 전자정보센터, 2009년 1월.
- [2] 이호준, "안테나 산업동향", 전자정보센터, 2008년 12월.
- [3] Taga, "Analysis for mean effective gain of mobile antennas in land mobile radio environments", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 39, no. 2, pp. 117-131, May 1990.
- [4] Y. Shin, S. Park, "Spatial diversity antenna for WLAN



[그림 12] 다양한 형태의 이중 주파수 가변 ENG ZOR 안테나 구조

- application", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 49, no. 6, pp. 1290-1294, Jun. 2007.
- [5] S. Blanch, J. Romeu, and I. Corbella, "Exact representation of antenna system diversity performance from input parameter description", *IEEE Electronics Letters*, vol. 39, no. 9, pp. 705-707, May 2003.
- [6] R. G. Vaughan, J. B. Anderson, "Antenna diversity in mobile communications", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 36, no. 4, pp. 149-172, Nov. 1987.
- [7] A. C. K. Mak, C. R. Rowell, and R. D. Murch "Isolation enhancement between two closely packed antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 11, pp. 3411-3419, Nov. 2008.
- [8] C. H. Lee, S. Y. Chen, and P. Hsu, "Integrated dual planar inverted-F antenna with enhanced isolation", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Accepted for publication in a future issue, 2009.
- [9] H. Li, J. Xiong and S. L. He, "Extremely compact dual-band PIFAs for MIMO application", *IEEE Electronics Letters*, vol. 45, no. 17, pp. 869-870, Aug. 2009.
- [10] R. A. Bhatti, J. H. Choi, and S. O. Park "Quad-band MIMO antenna array for portable wireless communications terminals", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 129-132, 2009.
- [11] H.-W. Son, "Design of dual-polarised microstrip antenna with high isolation using capacitive feeds", *IEEE Electronics Letters*, vol. 45, no. 11, pp. 533-534, May 2009.
- [12] X. Wang, W. Chen, Z. Feng, and H. Zhang, "Compact dual-polarized antenna combining printed monopole and half-slot antenna for MIMO applications", in *Proc. IEEE AP-S Int. Symposium*, 1-5, Jun. 2009.
- [13] X. Wang, Z. Feng, and K. M. Luk, "Pattern and polarization diversity antenna with high isolation for portable wireless devices", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 209-211, 2009.
- [14] M. Mohajer, G. Z. Rafi, and S. Safavi-Naeini, "MIMO antenna design and optimization for mobile applications", in *Proc. IEEE AP-S Int. Symposium*, Jun. 2009.
- [15] A. Diallo, C. Luxey, P. L. Thuc, R. Staraj, and G. Kossiavas, "Enhanced two-antenna structures for universal mobile telecommunications system diversity terminals", *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 2, no. 1, pp. 93-101, Feb. 2008.
- [16] G. Park, M. Kim, T. Yang, J. Byun, and A. Kim, "The compact quad-band mobile handset antenna for the LTE700 MIMO application", in *Proc. IEEE AP-S Int. Symposium*, 1-5, Jun. 2009.
- [17] S.-C. Chen, Y.-S. Wang, C.-W. Ling, and S.-J. Chung, "A new isolation dual-antennas with miniature decoupling network design", in *Proc. IEEE AP-S Int. Symposium*, Jun. 2007.
- [18] C.-Y. Lui, Y.-S., Wang, and S.-J. Chung "Two nearby dual-band antennas with high port isolation", in *Proc. IEEE AP-S Int. Symposium*, Jun. 2008.
- [19] N. Lopez, C. J. Lee, A. Gummalla, and M. Achour, "Compact metamaterial antenna array for long term evolution (LTE) handset application", *IEEE International Workshop*, 2-4, Mar. 2009.
- [20] C. -J. Lee, A. Gummalla, "Compact dualband antenna subsystem for MIMO application", *IEEE International Workshop on* 2-4, Mar. 2009.
- [21] S. Hwang, T. Yang, J. Byun, and A. Kim, "Complement pattern on metamaterial antenna for reducing mutual coupling in MIMO systems", *3rd Eu-*

- ropean Conference Antennas and Propagation on 23-27, Mar. 2009.
- [22] C. C. Hsu, K. H. Lin, H. L. Su, H. H. Lin, and C. Y. Wu, "Design of MIMO antennas with strong isolation for portable applications", in *Proc. IEEE AP-S Int. Symposium*, Jun. 2009.
- [23] A. Lai, C. Caloz, and T. Itoh, "Composite right/left-handed transmission line metamaterials", *IEEE Microwave Magazine*, pp. 34-50, Sep. 2004.
- [24] A. Lai, K. M. K. H. Leong, and T. Itoh, "Infinite wavelength resonant antennas with monopolar radiation pattern based on periodic structures", *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, vol. 55, no. 3, pp. 868-876, Mar. 2007.
- [25] F. Qureshi, M. A. Antoniadis, and G. V. Eleftheriades, "A compact and low-profile metamaterial ring antenna with vertical polarization", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 4, pp. 333-336, 2005.
- [26] S. Baek, S. Lim, "Miniaturised zeroth-order antenna on spiral slotted ground plane", *IET Electronics Letters*, vol. 45, no. 20, pp. 1012-1014, Sep. 2009.
- [27] J. Park, Y. Ryu, J. Lee, and J. Lee, "Epsilon negative zeroth-order resonator antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 12, pp. 3710-3712, Dec. 2007.
- [28] J. Kim, J. Choi, "Design of a multiantenna structure for WCDMA and Wibro MIMO systems using ENG-ZOR unit cells", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 52, no. 1, pp. 13-17, Jan. 2010.
- [29] J. Kim, J. Choi, "Design of and ENG-ZOR multi-band antenna for GPS and WLAN MIMO system", *ISAP2008*, Taipei, Taiwan, Oct. 2008.
- [30] (주)EMW 안테나, 메타머티리얼을 이용한 초소형 이중대역 안테나, 10-0779407, 2007년 11월.
- [31] J. Kim, J. Choi, "Dual band MIMO antenna using ENG zeroth order resonator for 4G system", *iWAT 2009*, Santa Monica, USA, Mar. 2009.
- [32] J. Ji, Gi. Kim, and W. Seong, "A compact multi-band antenna based on CRLH-TL ZOR for wireless mobile system", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 51, no. 12, pp. 2852-2855, Dec. 2009.
- [33] J. Kim, G. Kim, W. Seong, and J. Choi, "A tunable internal antenna with an epsilon negative zeroth order resonator for DVB-H service", *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 12, Dec. 2009.
- [34] (주)EMW 안테나, 메타머티리얼을 이용한 초소형 안테나, 10-907436, 2009년 7월.
- [35] (주)EMW 안테나, 공진 주파수 가변형 안테나, 10-0891623, 2009년 3월.

≡ 필자소개 ≡

최 재 훈



1980년: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1986년: 미국 Ohio State University 전기
공학과 (공학석사)
1989년: 미국 Ohio State University 전기
공학과 (공학박사)
1989년~1991년: 미국 Arizona State Uni-
versity 연구교수

1991년~1995년: 한국통신위성사업본부 연구팀장

1995년~현재: 한양대학교 전자통신공학부 교수

[주 관심분야] 안테나 및 마이크로파 회로 설계, EMC

한 민 석



2002년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공
학사)
2005년 8월: 한양대학교 전자통신컴퓨터
공학과 (공학석사)
2005년~2007년: LG전자기술원 주임연
구원
2007년 9월~현재: 한양대학교 전자통신

컴퓨터공학과 박사과정

[주 관심분야] RF소자 및 안테나 설계

김 정 표



2000년 2월: 제주대학교 통신공학과 (공
학사)
2002년 2월: 한양대학교 전자통신전파공
학과 (공학석사)
2004년 2월~2007년 7월: (주)EMW안테
나 선임연구원
2007년 8월: 한양대학교 전자통신전파공

학과 (공학박사)

2007년 9월~현재: 한양대학교 전자통신공학부 연구교수

[주 관심분야] 안테나 및 마이크로파 회로 설계, meta-mate-
rials